

風洞実験データに基づく飛砂量鉛直分布予測法の確立

久保田進¹・保坂幸一²・鵜飼正志³・堀田新太郎⁴

海浜における飛砂量鉛直分布を適切に予測する手法を開発するため、現地規模の飛砂風洞装置を用いて飛砂量鉛直分布を測定した。実験に用いた砂は中央粒径 0.15 mm, 0.25 mm, 0.48 mm, 0.68 mm の 4 種の砂, および中央粒径 0.15 mm と 0.48 mm の砂を等容積で混合した砂, 計 5 種類の砂である。実験結果は、河村 (1951) による飛砂量鉛直分布式が実験データをよく説明することを示した。河村の飛砂量鉛直分布式には、実験によって定めなければならない 3 つの係数が含まれているが、多数の実験からこれらの係数を定めることができる実験式群を求めることができた。これにより、中央粒径と風速 (摩擦速度) が判れば、その風速 (摩擦速度) 時の飛砂量鉛直分布を計算することが可能となった。

1. はじめに

海岸に発生する飛砂は、海岸保安林を埋没し、海浜に隣接する道路・公園・居住地などへ侵入し、人々の生活環境・経済活動に影響を及ぼしている。海浜における飛砂制御は海岸工学上の 1 課題である。飛砂制御のために堆砂垣・フェンス・前砂丘など、いわゆる海岸砂防構造物が使用されるが、それらを適切に使用するためには、飛砂量の鉛直分布の理解が重要である。飛砂量の鉛直分布については幾つかの研究が成されているが (岩垣, 1950; 河村, 1951; Hotta・Horikawa, 1991), 未だ理解は十分でない。保坂ら (2005) は、粒径の揃った中央粒径 0.15 mm と 0.48 mm の 2 種の砂, および 2 種の砂を等容積で混合した砂, 計 3 種類の砂について、飛砂量鉛直分布についての風洞実験を実施した。その後、鉛直分布捕砂器を改良し、中央粒径 0.15 mm と 0.48 mm の砂についての再実験、中央粒径 0.25 mm と 0.68 mm の砂についての実験を実施した。その結果、粒径の揃った砂に対しては、粒径と風速から飛砂量鉛直分布を予測できる成果を得た。本研究の目的は、この成果を報告することである。

2. 実験データの解析に用いた数式

実験データ解析の根拠となる式をまとめて表記する。

(1) 風速鉛直分布 (Bagnold, 1954)

飛砂が発生している砂面上での風速鉛直分布は式 (1) で与えられる。

$$u_z = 5.75 u_* \log_{10} \frac{z}{z'} + u' \quad (1)$$

u_z : 砂面上のある高さ z における風速, u_* : 摩擦速度, (u', z'): フォーカルポイント (式 (1) の曲線群が集まる点)。

る点)。

(2) 全飛砂量式

全飛砂量に関する算定式は幾つかあるが、ここでは河村 (1951) による式 (2) を用いる。

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \quad (2)$$

q : 全飛砂量, g : 重力加速度, ρ_a : 空気の密度, u_{*c} : 移動開始限界摩擦速度, K : 実験係数。

(3) 飛砂量鉛直分布式

飛砂量の鉛直分布を予測する理論的な研究は限られている。河村 (1951) による式 (3) を検討の対象とする。

$$q(z) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2} K_0(\xi) - 2\sqrt{2} \beta \sqrt{\frac{h_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a \beta \sqrt{0.75 h_0}}{g} \xi^2 \{ K_0(\xi) + K_2(\xi) \} \right] \quad (3)$$

ここに

$$\xi = \sqrt{2z/h_0}, \quad \lambda = \bar{u}_1 / \sqrt{2gh_0}, \quad \beta = 3\pi\mu d/m$$

$$\int_0^\infty h f(h) dh = h_0$$

$q(z)$: 砂表面から高さ z における飛砂移動量, $\bar{u}_1$: 砂粒子が砂面より跳び出すときの水平速度の平均値, μ : 粘性係数, d : 砂粒子の粒径, m : 砂粒子の質量, a : 風速の鉛直分布を $u(z) = a\sqrt{z}$ と仮定したときの実験係数, G_0 : 単位面積より単位時間内に空気中に跳び出す砂粒子の総質量, K_0, K_1, K_2 : 0 次, 1 次, 2 次の変形された第 1 種ベッセル関数, h : 飛砂の飛高, h_0 : 砂粒子の到達する最高の高さの平均値, である。

重要なパラメータは G_0, h_0, a であり、これらは実験によって定められる定数である。 $\bar{u}_1$ は本来実験により求まる値であるが $\bar{u}_1$ の測定は難しい。河村 (1951) は写真の軌跡より平均的な $\bar{u}_1$ の値を求め、 λ の値としては平均的な値 2.0 を与えている。以後の解析においては便宜上 λ を定数 2.0 と仮定して使用することにする。

1 正会員 工博 日本大学教授理工学部土木工学科
2 修(工) (株)アイ・エス・エー河川第三部
3 修(工) 須山建設(株)環境ブロック土木グループ
4 正会員 工博 日本大学大学院教授総合科学研究科

3. 実験施設と方法

(1) 実験施設 (風洞, 風速計測装置, 捕砂器)

実験に用いた風洞は幅 1.0 m, 高さ 1.1 m, 長さ 20 m の吹出型風洞である。風洞底部に厚さ 10 cm の実験砂層を設けて, 断面 1.0×1.0 m が確保されている。

風速測定には熱線風速計を使用した。用いた風速計は 16 台である。外力算定のための風速鉛直分布を砂表面から高さ 2.5~62.5 cm の間に 15 台設置した。残りの 1 台は風洞内風速を制御するために用いた。飛砂量鉛直分布の測定には図-1 に示す捕砂器を使用した。捕砂器は, 風上から 15 m の地点に設置した。

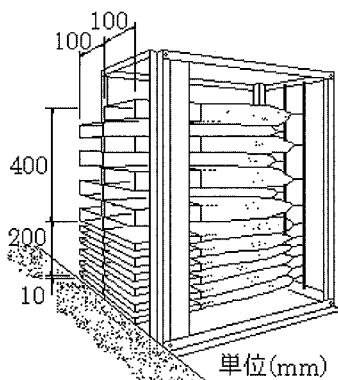


図-1 鉛直分布型捕砂器

(2) 実験に用いた砂の粒度特性

実験に用いた砂は鹿島海岸の砂で, 篩い分けし, 粒度を揃えた砂である。図-2 にこれらの砂の粒径加積曲線を示す。それぞれの中央粒径は 0.15, 0.25, 0.48, 0.68 mm となる。以後, 簡便のためにこれらの砂を D15, D25, D48, D68 と記す。図中の MD28 は, D15 と D48 の 2 種類の砂を容積比 1:1 で均等に混合した砂である。

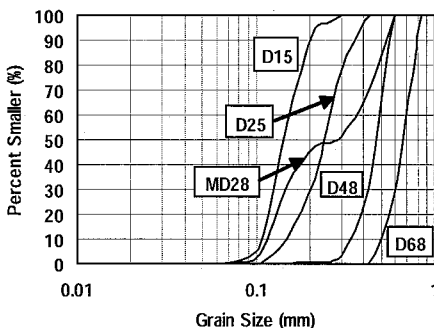


図-2 実験砂の粒径加積曲線

(3) 実験方法

実験は砂表面を平らに均した後, 所定の風速 (モータ

一回転数を制御) を吹送した。風の吹送時間は実験風速によって異なり 2 分から 10 分の範囲である。

4. 実験結果と考察

(1) 風速の鉛直分布

図-3 に砂面上の風速の鉛直分布を示す。図中の直線はデータを通る平均的な曲線である。MD28 は保坂ら (2005) のデータである。図-3 から D15, D25, MD28, D48, D68 においては高さ約 30 cm 程度まで, 対数則式 (1) が成立していることがわかる。対数則が成立していれば, 風速鉛直分布から摩擦速度が計算できる。フォーカルポイントの値は D15 で (320 cm/s, 0.13 cm), D25 で (356 cm/s, 0.6 cm), MD28 で (400 cm/s, 0.6 cm) D48 で (600 cm/s, 1.2 cm), D68 で (730 cm/s, 1.8 cm) である。

(2) 全飛砂量

図-4 に全飛砂量 (transport rate) を示す。全飛砂量は風洞末端集砂箱と鉛直捕砂器に捕捉された飛砂量を単位時間表示したものである。図中の D15N, D48N, MD28 は保坂ら (2005) のデータである。実験定数 $K=1.0$ での式 (2) が実験データを良く説明している。実験誤差内にあるようにも見えるが, 詳細にデータを見れば, D48, D68 の全飛砂量は D15, D25 より大きい傾向がある。この傾向は, 粒径の揃った砂では, 粒径の小さい砂より粒径の大きな砂の実験定数が大きくなる, という従来の傾向と一致する。MD28 の全飛砂量は D15 と同じか, あるいは僅かに小さい傾向がある。この事実, 粒径の揃った 2 種類の砂の混合砂の飛砂量は小さい粒径の飛砂量に近い, という堀田ら (1999) の実験結果と一致する。

(3) 使用した捕砂器の捕砂効率

捕砂器の幅は 10 cm, 風洞の幅は 1 m である。捕砂効率は, $Wt/\{(Wt+Ww)/10\}$ と定義する。ここに, Wt は捕砂器に捕捉された飛砂全量, Ww は風洞末端集砂箱に捕捉された飛砂全量である。図-5 (a) (b) に捕砂効率を示す。捕砂効率は D15 で u_* が 10 cm/s~140 cm/s の範囲では u_* が大きくなるほど, 捕砂効率も直線的に大きくなる。 u_* が 140 cm/s 以上に達すると一定となり, 平均的な値は約 0.45 である。D25 にも D15 と類似した傾向が見られる。 u_* が約 120 cm/s で捕砂効率は約 0.45 になる。MD28, D48, D68 は, 捕砂効率がほぼ一定だといえる。平均的な捕砂効率は 0.55 程度である。

(4) 飛砂量の鉛直分布

図-6 に測定された鉛直分布と式 (3) の予測結果の例を示す。鉛直分布は捕砂効率で補正されている。図-6 は (a), (b), (c), (d), (e) のいずれにおいても式 (3) が実験データに良く一致していることを示してい

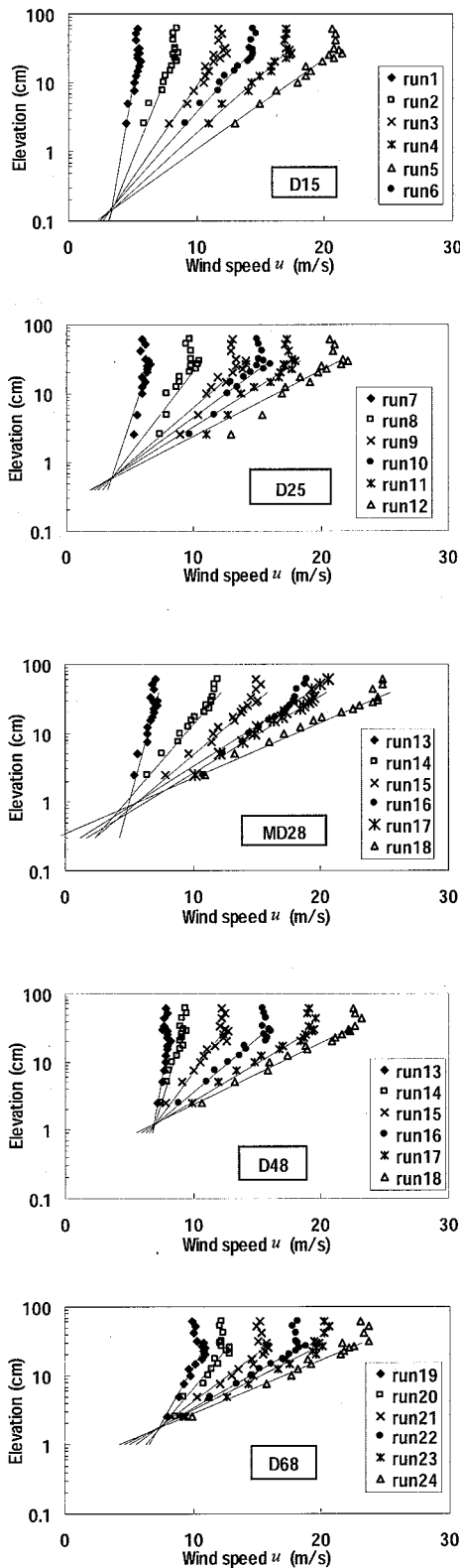


図-3 風速鉛直分布

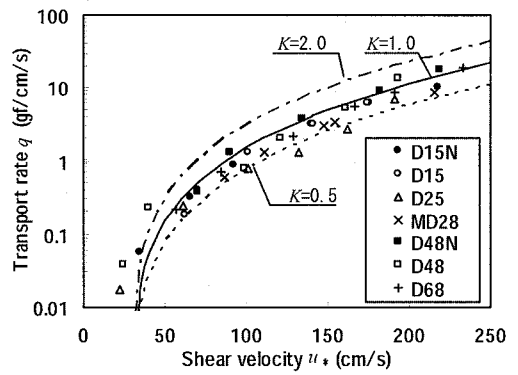


図-4 全飛砂量

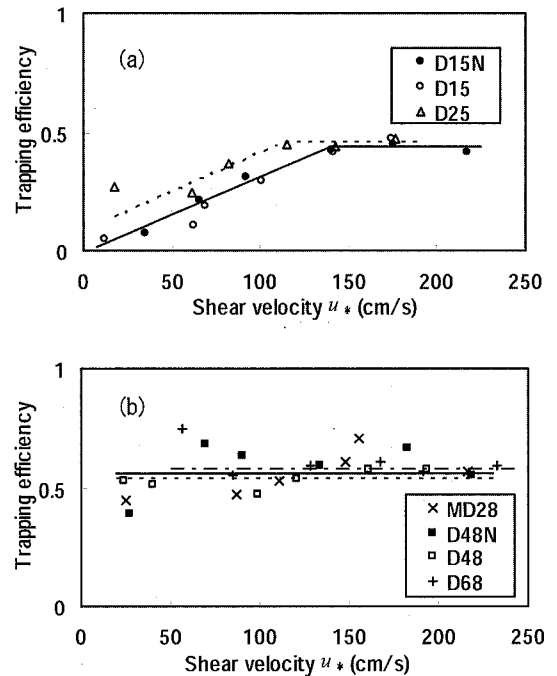


図-5 使用した捕砂器の捕砂効率

る。図-6(a), (b), (c), (d), (e)に描かれている曲線の傾きは、(a), (b), (c), (d), (e)の順に急になっている。この事実は粒径の大きい砂粒子ほど高い地点に達する量が多いことを意味する。粒径の大きい砂粒子の跳躍運動の高さは粒径の小さい砂粒子より高い、と解釈すればこの現象を説明することが出来る。砂粒子が落下する時に保有する運動量(エネルギー)は粒径の大きい砂粒子ほど大きい。従って、地表面に落下し、反発して再び跳躍運動に入った時、その跳躍高さは粒径の大きい砂粒子ほど高い、と考えることに矛盾はない。

(5) 河村(1951)式内のパラメータ算定法

河村(1951)による式(3)で重要となる係数パラメ

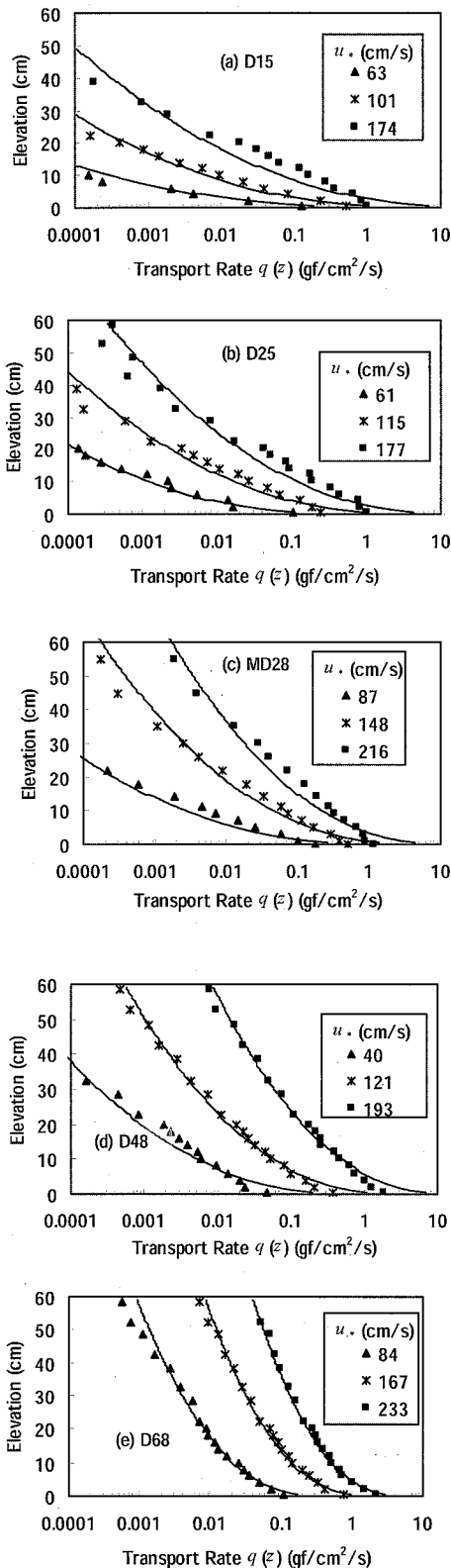


図-6 飛砂量鉛直分布の例

ターは a , G_0 , h_0 である。これらの値は実験によって定めなければならない。

図-7 に実験で得られた a と摩擦速度 u_* の関係を示す。 a は粒径による差異は見当たらない。この事実は、この範囲の粒径の差異による砂面上の境界層の差異は実験誤差程度であることを意味する。 a と u_* は直線関係になる。図-7 から図中の平均的な直線の傾き、切片は容易に求まり、実験式 (4) を得る。

$$a = 1.53u_* + 90.5 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 a の単位は $\sqrt{\text{cm/s}}$, u_* は cm/s である。

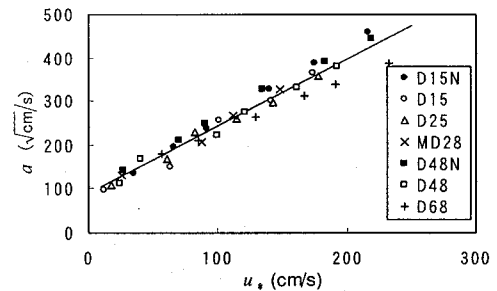
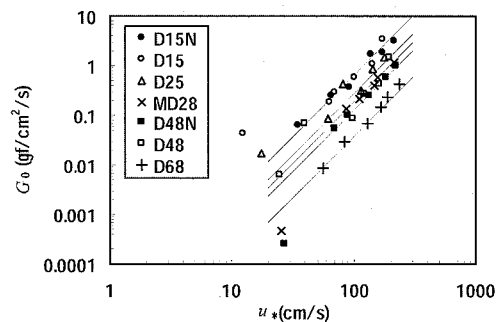
図-7 a と u_* の関係

図-8 に両対数紙上の G_0 と u_* の関係を示す。各々の粒径を通る平均的な直線は平行でその傾きの勾配が 2.5 である。よって G_0 は式 (5) の形式に表される。

$$G_0 = Au_*^{2.5} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 A は $\text{gf} \cdot \text{s}^{1.5} / \text{cm}^{4.5}$ の次元を持つ値となる。同一の摩擦速度において、中央粒径 d が小さいほど G_0 は小さくなるから、図-8 での切片 A は粒径 d の増加に対して減少する。図-8 から得られる A と粒径 d の関係を図-9 に示す。 A と d の関係は図中の曲線から式 (6) で表される。

$$A = 2 \times 10^{-9} d^{-2} \dots \dots \dots (6)$$

図-8 G_0 と u_* の関係

式 (6) を式 (5) に代入し、 G_0 についての実験式 (7) を得る。

$$G_0 = 2 \times 10^{-9} d^{-2} u_*^{2.5} \dots \dots \dots (7)$$

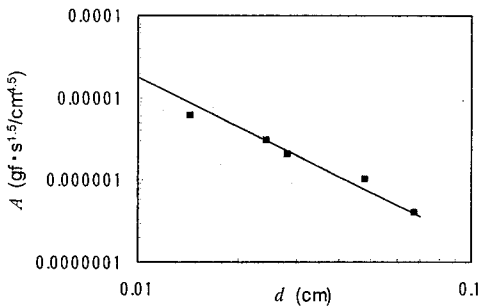


図-9 A と d の関係

ここに、 G_0 の単位は $\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$ 、 d は cm である。

図-10 に h_0 と u_* の関係を示す。 h_0 は u_* に比例し増加する直線分布となり、式(8)の形で表すことができる。

$$h_0 = Bu_* + C \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、傾き B は s 、 C は cm の次元を持つ値となる。図-9 は、 h_0 は中央粒径 d が大きくなるほど大きくなり、 u_* の増加に対する傾きは、急になることを示している。

図-10 から得られる傾き B と d の関係を図-11 に示す。 B と d は直線関係にあり、式(9)で表される。

$$B = 0.181d + 0.004 \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に図-12 に切片 C と d の関係を示す。図中の曲線の勾配は3である。図-12 より C と d の関係は式(10)になる。

$$C = 12500d^3 \quad \dots\dots\dots (10)$$

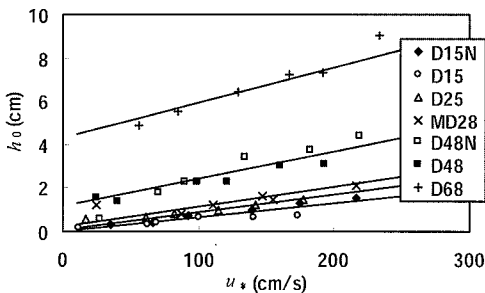
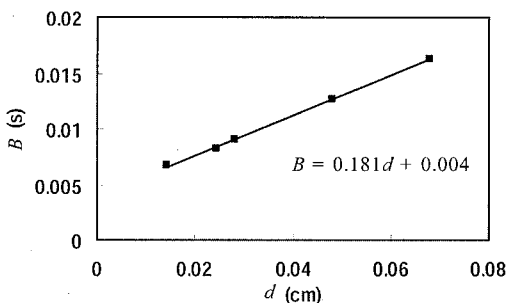
図-10 h_0 と u_* の関係

図-11 B と d の関係

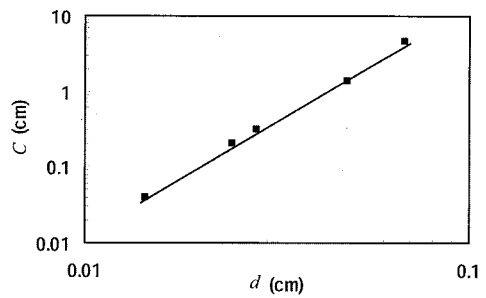


図-12 C と d の関係

式(9)、(10)を式(8)に代入し、 h_0 についての実験式(11)を得る。

$$h_0 = (0.181d + 0.004)u_* + 12500d^3 \quad \dots\dots\dots (11)$$

5. 結 論

以上の結果から粒径と風速(摩擦速度)が解かれれば粒径の揃った砂について、河村による鉛直分布式の実験係数を求めることができ、飛砂量鉛直分布の計算が可能となる。特筆すべきは、粒径の異なった2種類の砂(0.15 mm と 0.48 mm)を混合した砂に対しても、その中央粒径を代表値として粒度のそろった砂と同様の結果が得られたことである。この結果を拡大解釈すれば、粒度分布の広い砂に対しても、本実験結果が適用できることになる。結局、海岸における通常の砂に対して飛砂量鉛直分布の予測が可能になった、と結論できよう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり久保田、堀田は、平成17年度日本大学学術助成金、総合研究「水域開発と環境保全に資する工法の総合研究」、堀田は、平成14年度科学研究費補助金、基盤研究(C)2、課題番号14550515の助成金の一部を利用した。記して、著者らは関係諸機関、各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 岩垣雄一(1950)：網代港埋没に関する飛砂の影響について、土木学会誌、35巻6号、土木学会、pp.19-25。
- 河村龍馬(1951)：飛砂の研究、東京大学理工学研究所報告、第5巻、pp.95-112。
- 保坂幸一・鶴飼正志・久保田進・堀田新太郎(2005)：飛砂量鉛直分布についての風洞実験、海岸工学論文集、第52巻、pp.421-425。
- 堀田新太郎・久保田進・田中寛好・池田雅史・遠藤路子・奥山寛史(1999)：双峰型粒度分布を持つ砂層上の飛砂現象について、海岸工学論文集、第46巻、pp.511-515。
- Bagnold, R.M.(1954)：The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co.Ltd., London, 265p.
- Hotta, S. and K. Horikawa(1991)：Vertical distribution of sand transport rate by wind, Coastal Eng. in Japan, JSCE, pp.81-100。